

富士北麓水資源の保全と活用のための水文科学的研究

小田切幸次¹・佐野 哲也²・村中 康秀³・神谷 貴文³・内山 高⁴・山本 真也⁴・長谷川達也⁴・中村 高志²・
渡辺 雅之³・吉澤 一家¹・内山美恵子⁵・赤塚 慎⁴・古屋 洋一³

(¹山梨県衛生環境研究所, ²山梨大学国際流域環境研究センター, ³静岡県環境衛生科学研究所, ⁴山梨県富士山科学研究所,
⁵都留文科大学)

Hydrologic science research for the management and utilization of ground water resources in the northern piedmont area of Mount Fuji

Koji ODAGIRI², Tetsuya SANNO⁴, Yasuhide MURANAKA³, Takafumi KAMITANI³, Takashi UCHIYAMA¹, Shinya YAMAMOTO¹, Tatsuya HASEGAWA¹, Takashi NAKAMURA⁴, Masayuki WATANABE³, Kazuya YOSHIZAWA², Mieko UCHIYAMA⁵, Shin AKATSUKA¹ and Yoichi FURUYA³ (¹Yamanashi Institute for Public Health, ²University of Yamanashi, ³Shizuoka Institute of Environment and Hygiene, ⁴Mount Fuji Research Institute, ⁵Tsuru University)

要約：山梨県内のうち、富士北麓地域では生活・産業用水の水源のほぼすべてを地下水等に依存している。本研究では富士北麓の水資源としての地下水等の量的および質的安全性を確保するため、水文科学的研究を行っている。

この中の基本的な水収支の解明に当たって、導入部にあたる降雨量を包括的に捉えるため、複数のXバンドMPレーダに基づいた合成データを用いて雨量推定を行った。その結果、富士山全体をカバーしつつ、狭い領域の降雨も緻密に捉えられることが分かった。さらに降水グリッド抽出方法について改善を検討したところ、特に対流性降雨事例において降雨量の推定精度を向上させることができた。

また、富士北麓の水の由来、起源を探るために水質等の調査・分析を行っている。本年度は忍野八海地域の流量調査を行った。その結果、忍野八海地域全体として0.396m³/sを得た。ただし、人工的な流入も見られるため今後個々の湧水量を測定し、検証する必要も出てきた。さらに湧水の関係で、湖底湧水の存在が指摘される河口湖において溶存バナジウム濃度の鉛直分布を調べた。その結果、夏季の水溫躍層以深でバナジウム濃度の低下が見られ、水中でのスキベンディング（除去）が示唆された。また、鵜の島西部で水質及び湖内流動観測を行った結果、南北両岸の崖斜面上で水溫の高い水塊が確認され御坂山地及び富士山溶岩からの湧水が示唆された。

Abstract : The resource of potable and industrial water supply is dependent more than ca.60% on the groundwater in Yamanashi Prefecture, and almost all in Mount Fuji northern foot area, especially. Therefore, we demonstrate in this paper that, to ensure the quality and quantitative safety of the groundwater and spring as water resources in Mount Fuji northern foot area.

To estimate the rainfall amount with water budget comprehensively, we investigated the accuracies of the rainfall amounts derived by the observations of plural X-band multi-parameter radars (X-MP radar) positioned in University of Yamanashi and Shizuoka prefecture. As a result, we found that plural X-MP radars covered the whole of Mount Fuji and derived detail rainfall amount in a narrow region. In addition, we reviewed the method of extraction from grid data, improved the accuracies of the rainfall amounts derived by the observations of plural X-MP radars in case of convective rain.

And also we conducted a water quality and discharge survey of Oshino Hakkai Springs. Oshino Hakkai Springs discharge about 0.396 m³/s into the nearby river. Finally, Vertical distribution of vanadium concentrations in Lake Kawaguchi show significantly decreased below thermocline during summer, suggesting that vanadium is likely scavenged in water column. The lake survey revealed relatively high water temperature on the northern and southern slopes of the west lake basin, suggesting water inflow from both Misaka Mountains and lava plateau of Mount Fuji.

1. 緒言

山梨県は生活・産業用水の水源の約6割を、とくに富士北麓地域ではほぼすべてを地下水等に依存している。さらに、近年では富士山の地下水の水質特性から、富士

山麓ではミネラルウォーター関連産業が急発展し、水資源としての地下水の量と質の把握が急務となっている。しかしながら、富士山麓地域では火山山麓特有の複雑な地質構造から地下水流動の実態が十分解明されていない。このような状況で、富士山麓、特に富士北麓で将来

にわたり安全な地下水・湧水を安定的に利用していくためには、富士北麓での水資源の総合管理・保全計画が必要とされる。さらに、世界文化遺産「富士山」の構成資産の一つとしての湧水群や富士五湖の水環境を将来にわたって保全していくためにも、富士山としての水環境の保全対策が必要とされる。

このような中、本研究では富士北麓の水資源としての地下水・湧水の量的および質的安全性を確保するため、水文科学的な現状を把握することとした。この第一歩として水収支の導入部にあたる降雨量を高精度かつ定量的に把握するため、昨年度は富士北麓地域を対象とした単一のXバンドMPレーダによる雨量推定を試み、その有用性を示すことができた。今年度は富士山の水資源を包括的に捉えるために、複数のXバンドMPレーダを用いて富士山全体の雨量推定を行った。また、蒸発散量の推定には、従来の水収支法等とあわせて、サップフローセンサーシステムを用いた試行もおこなう。これらの研究結果より、地下水の量的把握、水収支の検討を行う予定である。

さらに加えて、富士北麓の地下水・湧水の水質や由来に関する検討をおこなうために、代表的な湧水群である忍野八海、夏狩・十日市場湧水郡および富士五湖の代表的な湖である河口湖において、主要イオン分析、微量元素分析、水の安定同位体比解析を実施する予定である。

もちろん本研究の最終目標は、以上のような種々の水文科学的調査・研究成果に基づいて、高精度の水理地質構造および水循環モデルを構築し、地下水流動系の解明をおこなう。このうえで当該地域の水収支結果ならびに水質にもとづいた検証結果から、富士北麓水資源の保全と活用のための水文科学的モデルと地下水資源賦存量等の基礎資料を提供することにある。

本論では今年度研究成果としての、降水量推定に関する複数XバンドMPレーダを用いた雨量推定、ならびに世界文化遺産富士山の構成資産の一つで、この地域の代表的な湧水群である忍野八海の湧水量測定と富士五湖の代表的な湖である河口湖の湖底湧水の解析結果について報告する。

2. 複数のXバンドMPレーダを用いた富士山周辺域での降雨量推定

2-1 解析対象地域・使用データ・解析方法の概要

2-1-1 解析対象地域

XバンドMPレーダによる解析対象地域を図2-1に示した。富士山の水資源を包括的に捉えるため、今年度は解析対象地域を富士北麓だけでなく富士山周辺域とした。本章で使用した地上雨量計の標高は富士北麓地域では860～2,305m間の高標高に設置してある一方、富士南麓では66～530m間とそれほど標高が高くない位置

にある。また解析対象地域について、Xバンドマルチパラメータレーダ(X-MPレーダ)は山梨大学のX-MPレーダ(以下、梨大レーダと呼ぶ)及び国土交通省が静岡県に3台設置しているX-MPレーダ(通称、X-RAIN)によって富士山全体をカバーして観測している。

2-1-2 使用データ

使用したデータは山梨大学及び国土交通省のXバンドMPレーダ、気象庁Cバンドレーダ、地上雨量計であり、各々の観測概要は以下のとおりである。

1) XバンドMPレーダ

使用した梨大レーダと3台のX-RAINは波長が約3cmの水平偏波と垂直偏波を送受信することで、降水の観測を行っている。最大観測範囲は梨大レーダが約64km、X-RAINは約80kmであり、5分毎12仰角のPlan Positional Indicator 観測(PPI観測)を1ボリュームとしたスキャンを行っている。

2) 気象庁Cバンドレーダ

気象庁Cバンドレーダは波長約5cmの水平方向に電界をもつ電波を送受信する。水平解像度約120kmで、5分毎の複数仰角PPI観測を1ボリュームとしたスキャンを行っている。データは気象庁編集・気象業務支援センター発行の水平解像度1kmメッシュ全国合成レーダから富士山周辺域の5分毎のデータを抽出し、解析データとして使用した。

3) 地上雨量計

本章において使用した地上雨量計データは解析対象地域内のうち、山梨県側に設置してある12地点及び静岡県側に設置してある3地点の計15地点である(観測位置を図1に示した)。観測単位は気象庁のアメダス及び富士山有料道路管理の雨量計が0.5mm単位、山梨県治水課管理の雨量計が1mm単位となっている。

その他、降雨事例を抽出する際の補完資料として、気象庁編集・気象業務支援センター発行のアジア太平洋地上天気図を用いた。

2-1-3 解析方法

梨大レーダ及びX-RAINの観測データについては、真木と朴(2009)¹⁾による降雨強度推定式に基づき、 Z_H (水平偏波のレーダ反射因子)、 K_{DP} (偏波間位相差変化率)を主としたパラメータを用いて降雨強度を算出した。なお降雨強度(R)については、 $K_{DP} \leq 0.3 \text{ deg/km}$ もしくは $Z_H \leq 30 \text{ dBZ}$ の時に $R-Z_H$ を採用し、これ以外では $R-K_{DP}$ を用いることとした。この算出結果から得られたデータを水平・鉛直解像度500m間隔の3次元グリッドデータへと変換し、地上雨量計の実測値との比較や推定降雨量分布を作成する際には、ある1つの水平グリッド内において鉛直方向に高度3.25kmまでの降雨強度を調べ、その最大値をそのグリッドでの降雨量

として設定した。

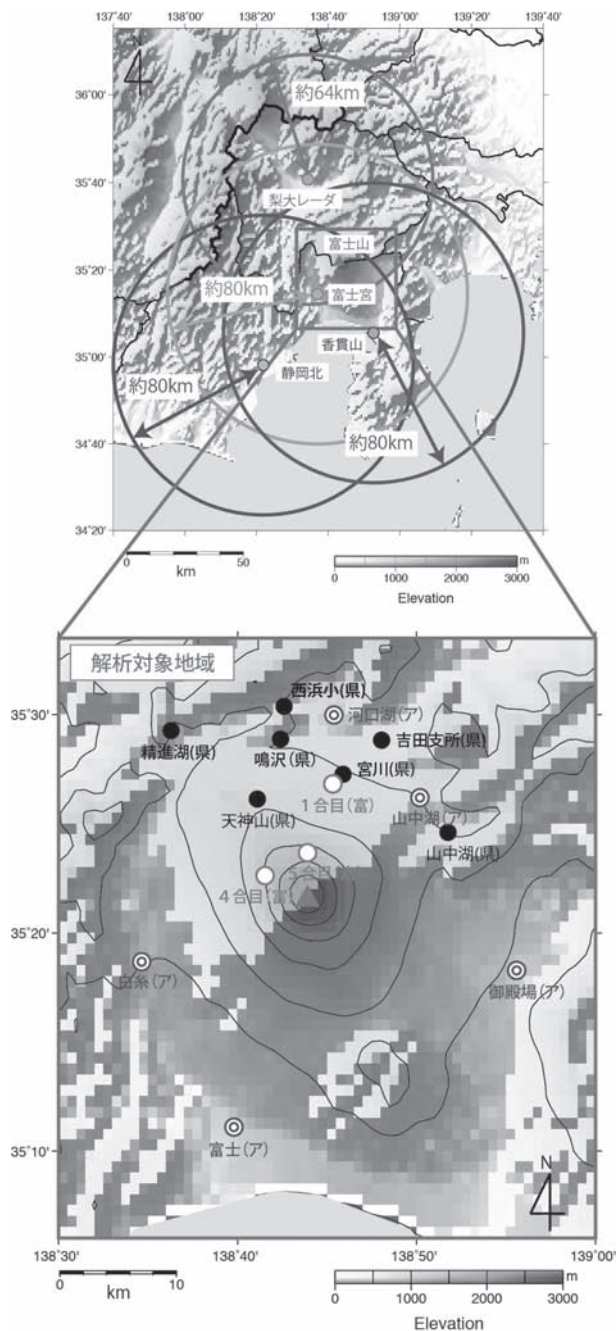


図2-1 (上) X-MPレーダの位置と観測範囲
(下) 解析対象地域と地上雨量観測地点の位置図
※●：山梨県，○：富士山有料道路，◎：気象庁が各々観測

また昨年度は単一のX-MPレーダのみによる降雨量推定を検討したが²⁾、今年度は複数のX-MPレーダを用いてグリッド毎の降雨強度を比較し、その最大値を採用する手法を使った合成データを作成し、単一の推定結果との精度の比較を行った。

X-MPレーダに対する比較対象としては気象庁Cバンドレーダのデータを使用した。1 kmメッシュ全国合成

レーダのバイナリデータから、降雨強度に該当する部分を抽出した。この抽出結果から得られた水平解像度1kmのグリッドデータ(高度は約2km)を用いて、X-MPレーダと同様に降雨量を推定した。

これら気象レーダからの推定結果に基づいて、富士山周辺域に設置されている各々の地上雨量計データの実測値(地点データ)と地上雨量計が位置する緯度経度座標が当てはまる気象レーダのグリッドデータ(面データ)とを比較し、気象レーダで推定された降雨量の精度について検証した。推定精度の検証には推定値が実測値からどの程度乖離しているかを表す次式のRMSE(二乗平均平方根誤差)を用いた。RMSEの値が“0”に近い値ほど、推定精度が良い。なお、解析対象とした事例は2013年夏季において特徴的な降雨が見られた11事例である(表2-1)。なおJSTはJapan Standard Time(日本標準時)の略称である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

N：全推定対象数， y_i ：実測値， \hat{y}_i ：推定値

表2-1 2013年夏季における解析対象事例

事例No.	解析対象期間
1	2013年7月17日00:00 ~ 2013年7月17日08:00 JST
2	2013年7月23日12:00 ~ 2013年7月23日17:00 JST
3	2013年7月29日06:00 ~ 2013年7月29日16:00 JST
4	2013年8月05日16:00 ~ 2013年8月05日22:00 JST
5	2013年8月06日23:00 ~ 2013年8月07日03:00 JST
6	2013年8月07日13:00 ~ 2013年8月07日17:00 JST
7	2013年8月11日15:00 ~ 2013年8月11日20:00 JST
8	2013年8月25日03:00 ~ 2013年8月25日20:00 JST
9	2013年8月26日20:00 ~ 2013年8月27日08:00 JST
10	2013年9月04日08:00 ~ 2013年9月05日07:30 JST
11	2013年9月24日22:00 ~ 2013年9月25日22:00 JST

2-2 解析結果

2-2-1 気象レーダの推定に基づく積算降雨量分布

図2-2は事例No.2(2013年7月23日12:00 ~ 17:00JST)における各気象レーダの推定に基づいた積算降雨量分布図である。図2-1のX-MPレーダと富士山との位置関係から、各レーダから富士山までの領域については細かな部分まで降雨推定ができていたものの、(a)の静岡北レーダでは富士山の北西~北東部分、(b)の富士宮レーダでは富士山の北西象限、(c)の香貫山レーダでは富士山の北北西部分、(d)の梨大レーダでは富士山の南~東の大部分において、各々レーダ観測の空白域が存在していることが分かった。一方、これらのX-MPレーダデータを合成した(e)ではそれぞれの空白域を補完し合い、富士山全体の対流性降雨を綿密に捉えていることが判明した。(f)の気象庁レーダによる推定結果は

富士山全体の降雨は捉えているが、局所的な降雨までは表現しきれない結果となった。

また本章における解析対象事例のうち、X-MPレーダ合成による推定結果が比較的良好な事例を図2-3に示した。これらの事例に共通する事項として、降水継続時間の長短に関わらず10分間あるいは1時間実測雨量値が大きい対流性降雨によるものであることが挙げられる。

一方で同じ解析対象事例のうち、X-MPレーダ合成による推定結果が比較的良好でない事例を図2-4に示した。両事例とも大局的な降雨量分布を似ているものの、気象庁レーダに比べてX-MPレーダ合成の推定結果が過大に表現されていることが分かる。両事例ともに比較的長い降水継続時間の間に0.5mm/10min～1.0mm/10minの弱い雨が継続していることから、層状性降雨によるものである。

2-2-2 降雨量の時間変化と推定精度

気象レーダによる推定値と地上雨量計による実測値の

時間変化について解析を行い、一例として富士山1合目の観測地点における2事例を図2-5に示した。図2-5上図は図2-2で示した事例No.2の対流性降雨事例であるが、15:00～15:40JSTに地上雨量計で観測された短時間強雨を両レーダともに推定できており、特にX-MPレーダ合成はほぼ実測値に近い推定値を示している。また13:30～14:10JSTにおけるゴーストピークについてもX-MPレーダ合成は気象庁レーダに比べて推定誤差を低減できている。推定精度を示すRMSEは気象庁レーダの5.87に対してX-MPレーダ合成は2.32であることから、推定精度はX-MPレーダ合成の方が良いことが分かった。

図2-5下図に示した事例No.3の層状性降雨事例については、7:30～14:30JSTに地上雨量計では断続的に0.5mm/10minの弱い雨を観測しているに対して、気象庁レーダでは若干過小評価ながらも雨量のトレンドを推定できている。しかしX-MPレーダ合成では雨量のトレンドは推定できているが、所々実測値の2～4倍の推定値を示しており、全体的に過大評価傾向である。RMSE

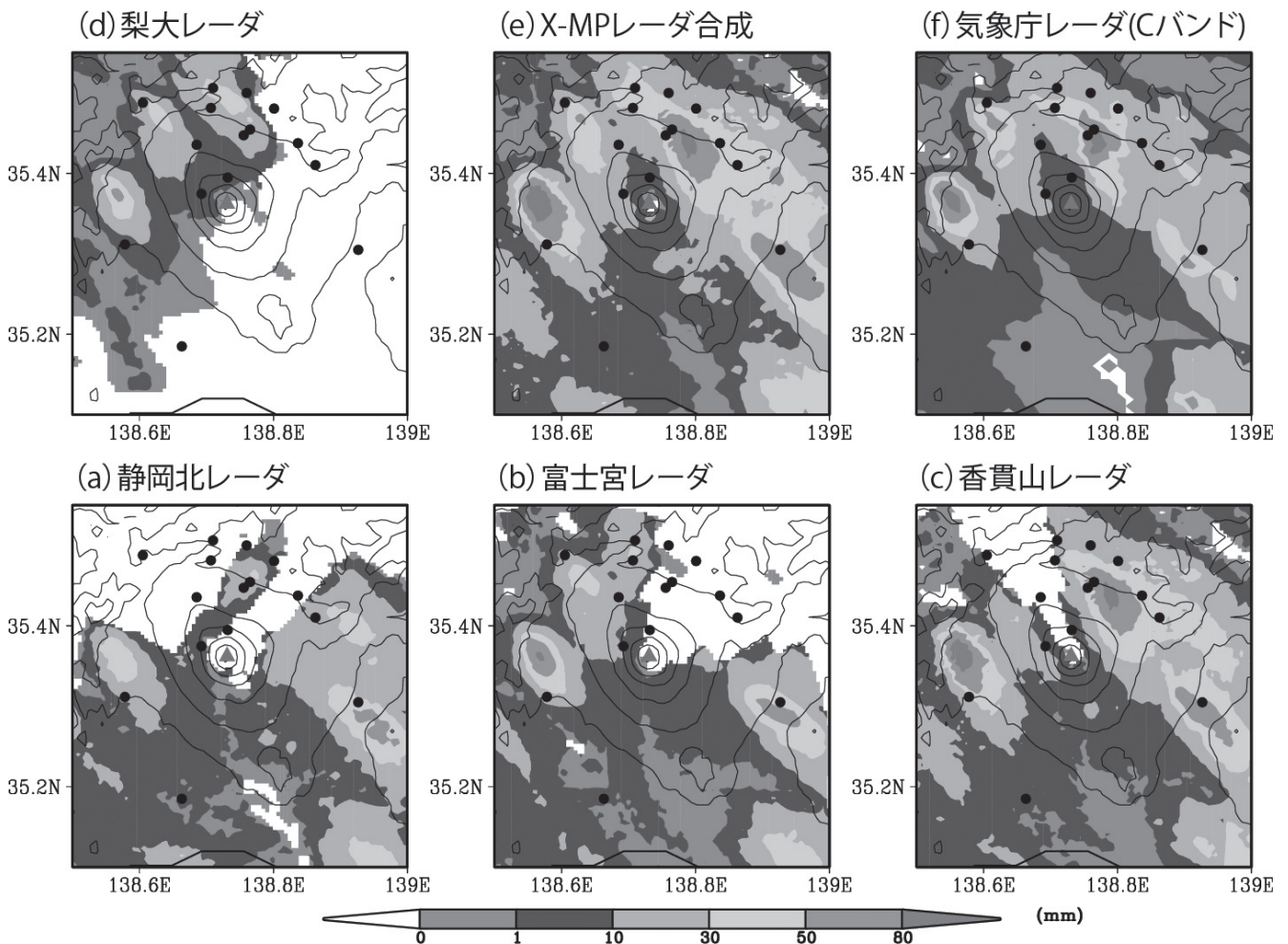


図2-2 事例No.2 2013年7月23日12:00～17:00JSTにおける各気象レーダの推定に基づいた積算降雨量分布図
 ※●：地上雨量計の観測地点

についても気象庁レーダの0.24に対してX-MPレーダ合成は0.64であることから、推定精度は気象庁レーダの方が良いことが分かった。

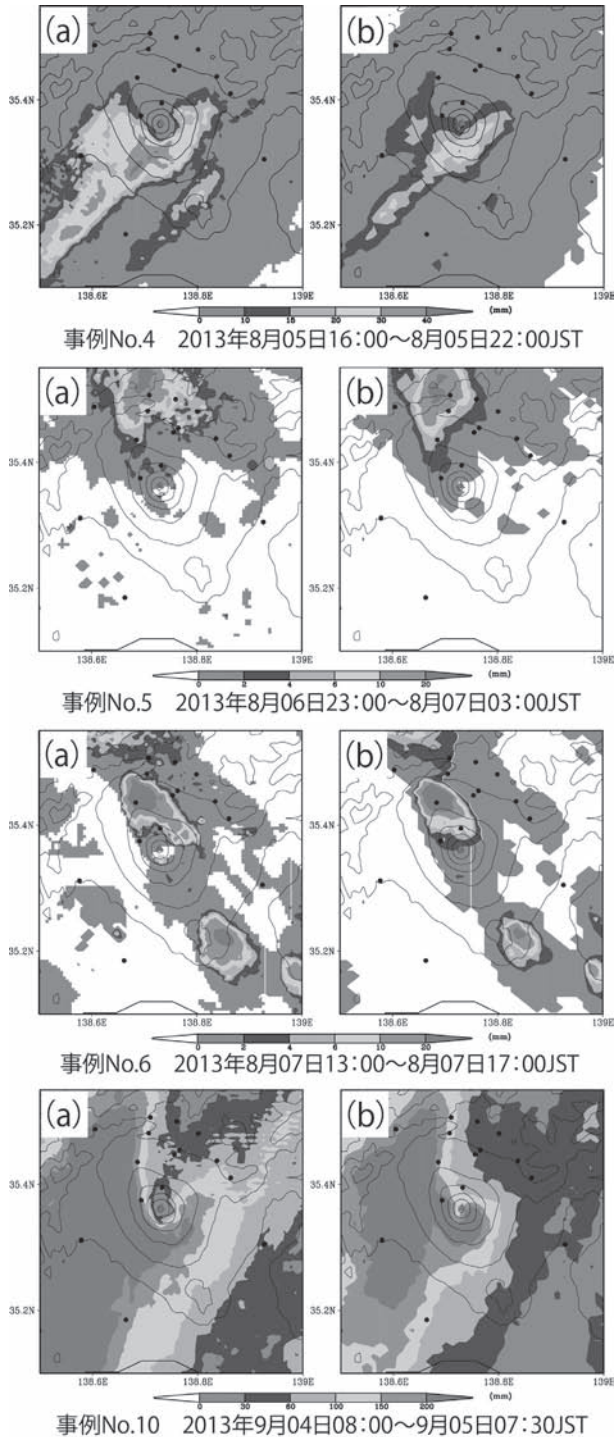


図2-3 各事例におけるX-MPレーダ合成と気象庁レーダの推定に基づいた積算降雨量分布図①
(a) X-MPレーダ合成, (b) 気象庁レーダ

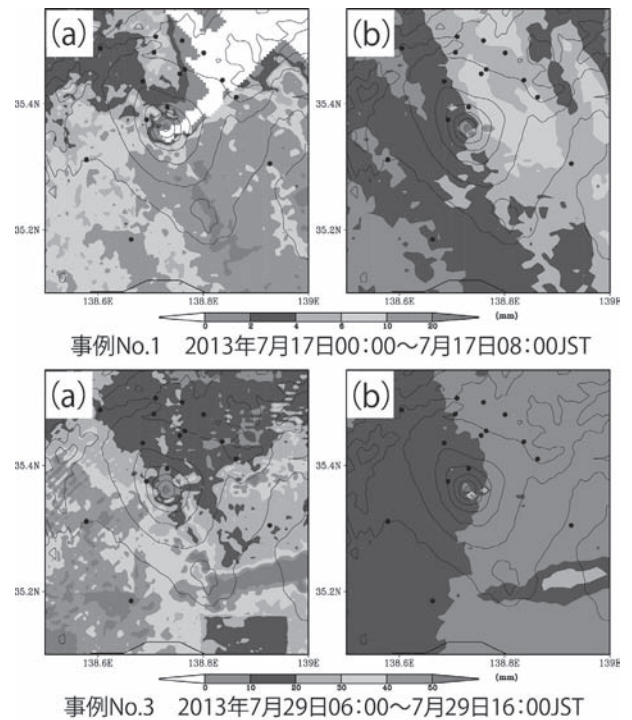


図2-4 各事例におけるX-MPレーダ合成と気象庁レーダの推定に基づいた積算降雨量分布図②
(a) X-MPレーダ合成, (b) 気象庁レーダ

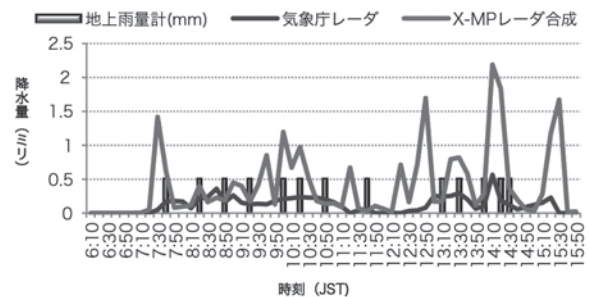
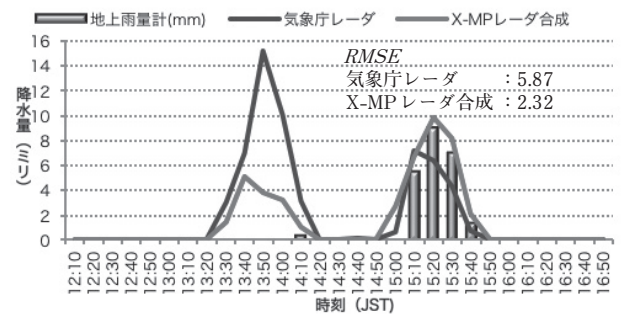


図2-5 富士山1合目におけるX-MPレーダ合成及び気象庁レーダの推定値と地上雨量計実測値の時系列変化
(上図) 事例No.2 2013年7月23日12:00~17:00JST
(下図) 事例No.3 2013年7月29日06:00~16:00JST

2-2-3 実測値と推定値に基づいた散布図・相関係数

X-MPレーダ合成及び気象庁レーダの推定値のばらつき具合を調べるため、各地点について全11事例のデータに基づいた散布図及び相関係数を求め、主な地点における結果を図6に示した。河口湖アメダスや富士山1合目など比較的標高の低い地点ではX-MPレーダ合成のデータのばらつきはあまり大きくなく、近似直線の傾きはほぼ $y = x$ の直線に近くなっている。気象庁レーダのデータは多少ばらつきが見られ、近似直線の傾きは $y = x$ よりも小さく、若干過小評価傾向である。富士山4合目のデータは両レーダともに富士山4合目と比べるとばらつきは少ないものの、さらに近似直線の傾きは小さくなり、特にX-MPレーダ合成の方は傾きは小さい。富士山5合目のデータは両レーダともに富士山4合目と比べるとばらつきは少ないものの、さらに近似直線の傾きは小さくなり、特にX-MPレーダ合成の方は傾きは小さい。富士山5合目のデータは両レーダともに富士山4合目と比べるとばらつきは少ないものの、さらに近似直線の傾きは小さくなり、特にX-MPレーダ合成の方は傾きは小さい。

2-2-4 降水グリッド抽出方法の改良について

従来のX-MPレーダを用いた降水グリッドの抽出方法を図2-7の上図に示す。2-1-3章で述べた通り、鉛直方向に高度3.25kmまでの降水グリッドを抽出したあと、グリッドの中の最大値をその地点(グリッド)での推定降水量としている。この場合、上空の強い降水強度を捉えてしまうことや地上付近の地形性ノイズを拾ってしまうことで、レーダによる推定値が地上雨量計の実測値と乖離してしまう可能性がある。そこで地上雨量計に近い所の上空の降水グリッドを捉えることで実測値に近い推定値を求めることができると考え、図2-7下図に示した方法を用いて抽出を試みた。最初に国土地理院発行の250mメッシュ地形図からX-MPレーダの解像度500mに合わせた標高データを作成し、標高データが存在するグリッドを地表面と設定した。そして各水平グリッドにおいて地表面より鉛直方向に上2層の降水グリッドを抽出し、そのうち大きい値の方をその地点(グリッド)での推定降水量とした。また地表面より上2層に降水グリッドがない場合、さらに鉛直方向に降水グリッドを探索して最初に到達した降水グリッドをその地点(グリッド)での推定降水量とした。

図2-5と同地点同事例における降水グリッド抽出方法の改善前と改善後の推定値の時間変化及びRMSEを図8に示した。図2-8上図の事例No.2(対流性降雨)において、13:30~14:10JSTに見られたゴーストピークは改良後の推定値の方が誤差を低減できている。また推定精度を示すRMSEは改良前のX-MPレーダ合成が2.32であるのに対して、改良後のX-MPレーダ合成が

● : (a) X-MPレーダ合成 ● : (b) 気象庁レーダ
 — : (a) の近似直線 — : (b) の近似直線
 : 傾き1の直線

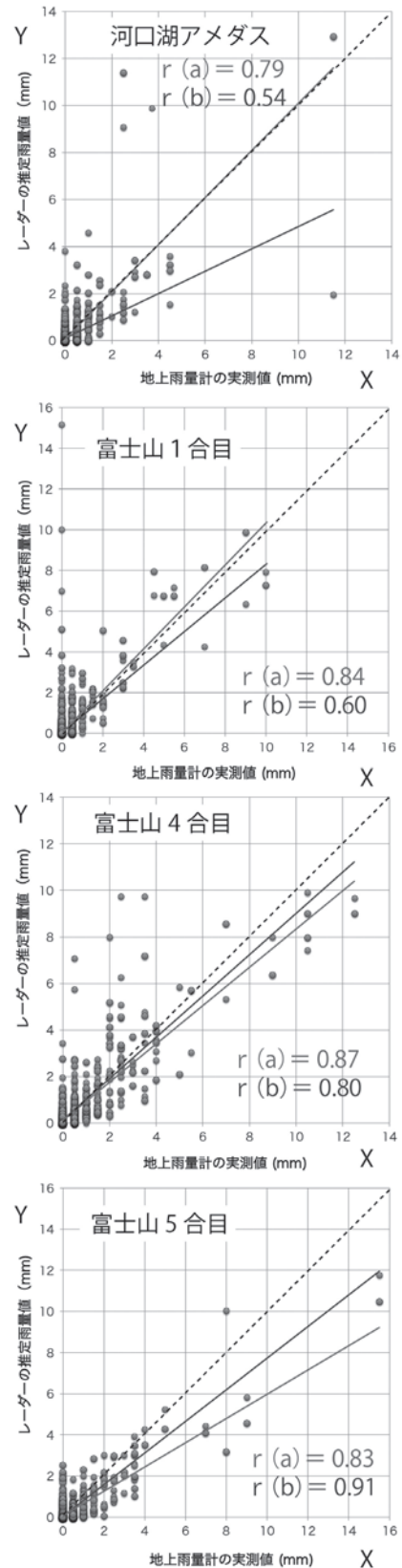


図2-6 主な地点における雨量の実測値と推定値の散布図及び相関係数 (r)
 (a) X-MPレーダ合成, (b) 気象庁レーダ

1.09であることから、改良後の推定値の方がより精度が高いことが分かった。

図2-8下図の事例No.2 (層状性降雨) では、対象時間内において所々で見られた過大な推定値は改良後も残っているが、改良前の値と比べると低減している。RMSEも改良前の0.64に対して、改良後は0.53と若干精度が良くなっていることが分かった。

また解析対象11事例について、地点毎のRMSEを降水グリッド抽出方法の改良前と改良後で比較したところ、改良後のRMSEの値が小さくなり推定精度が良くなった地点は15地点中10地点であったことから、本章で検討した新たな降水グリッドの抽出方法は一定の改善効果があると分かった。

2-3 考察

2-3-1 降雨の種類と推定精度との関係

2-2-1で述べたX-MPレーダ合成による推定値の積算降雨量分布や2-2-2章で述べた推定値の時間変化見られたとおり、対流性降雨の事例については推定値と実測値との誤差は少なく、推定精度が良いことが分かった。一方で層状性降雨の事例については全般的に推定値が過大評価傾向にあり、推定精度が良くないものもあることが分かった。

対流性降雨の場合、レーダ観測によって捉えられた降雨強度が強いことから、雨量推定に精度の高いR-KDPが採用されるためであるほか、地上雨量計で観測される雨も10分間雨量が数mm程度の強い雨であることが

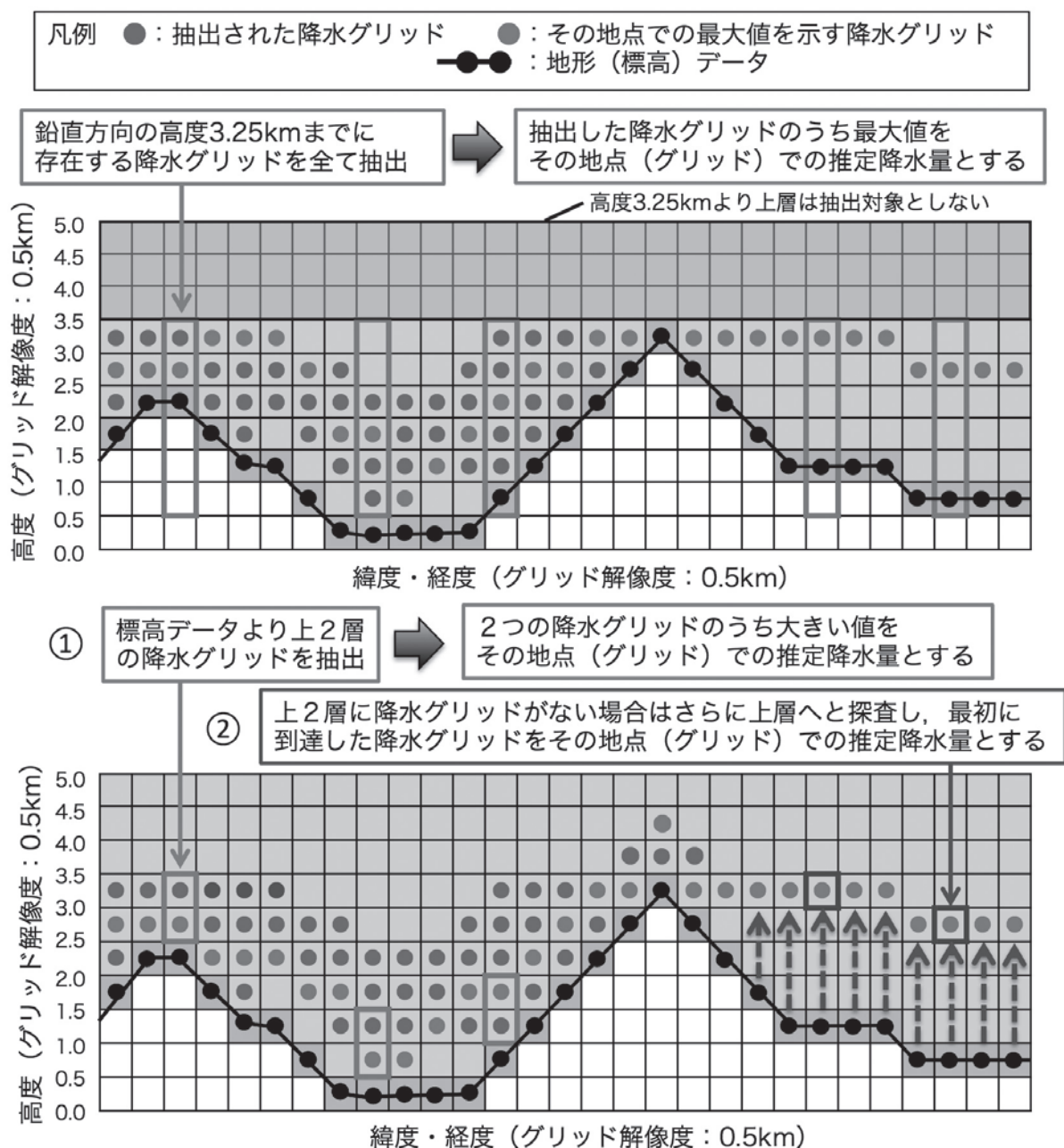


図2-7 降水グリッドの抽出方法の模式図 (上図) 従来的方法, (下図) 改良の検討をした方法

ら、推定値と実測値との間に応答時間の差があまりないことなどが結果的に高い推定精度をもたらしていると考えられる。層状性降雨の場合、レーダ観測によって捉えられた降雨強度が弱いことから、雨量推定にはR-KDPよりもR-Z_Hが採用されるために推定精度が若干落ちるほか、地上雨量計で観測される雨が10分間雨量または1時間雨量で0.5～1.0mm程度の弱い雨であることのために地上に到達した雨がすぐに記録されず、転倒ます型の雨量計内で雨がまとまった時に記録されることで推定値と実測値との間にタイムラグが生じるため結果的に推定精度の低下をもたらしていると考えられる。

2-3-2 改善後の降水グリッド抽出方法

2-2-4章で降水グリッドの抽出方法の改良を目的として解析を行った結果、事例No.2の対流性降雨事例については推定精度が大きく改善したことが分かった。より地上雨量計に近い所の高度の雨を捉えることで、実測値に近い降雨強度のデータを得られたためであると考えられる。一方事例No.3についても同様の処理を行ったが、RMSEの値はわずかに下がった程度で明瞭な改善は見られなかった。このことは層状性降雨事例においては、地上雨量計に近い高さの降雨強度のデータを得る影響よりも、降雨強度が弱い場合に採用されるR-Z_Hの推定式による影響の方が大きいためであることが推察される。

3. 忍野八海の湧出量及びの湖底調査

3-1 忍野八海の湧出量調査

3-1-1 調査場所及び方法

忍野八海の湧出量を把握するため、図3-1のとおり忍野八海湧池（山梨県南都留郡忍野村）とその周辺河川で流量調査を行った。

湧池（図3-1の①）では、流出路の幅と水深を長尺

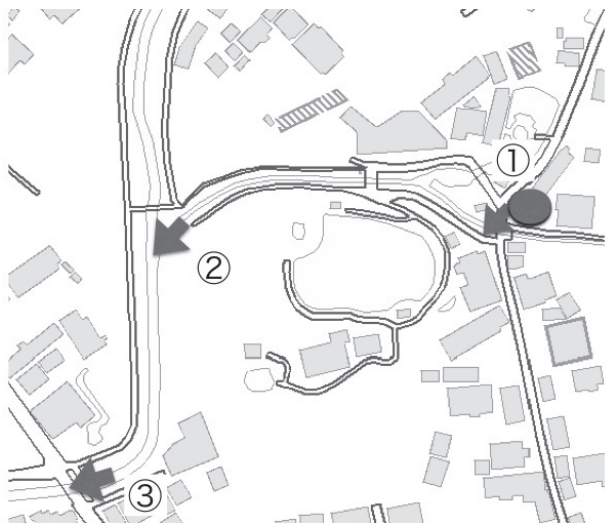


図3-1 忍野八海における流量調査位置
(国土地理院地図：下側が南)

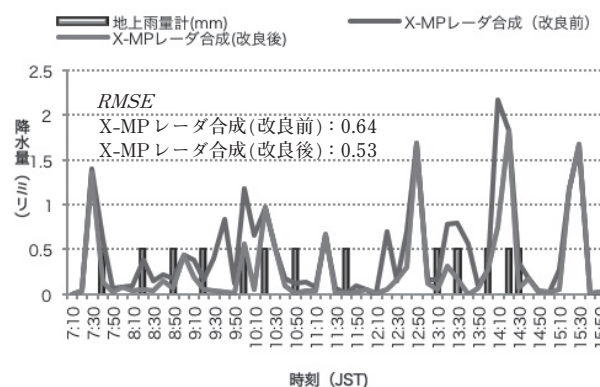
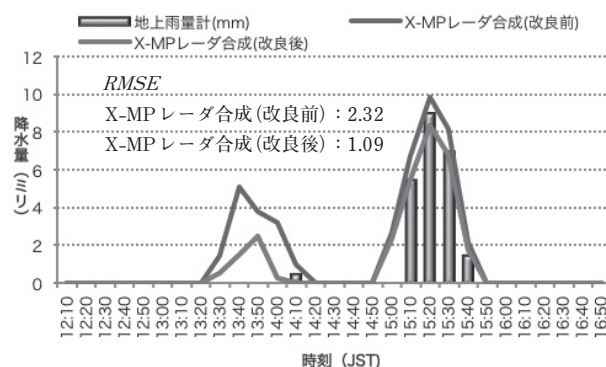


図2-8 富士山1合目におけるX-MPレーダ合成の改善前と改善後の推定値と地上雨量計実測値の時系列変化
(上図) 事例No.2 2013年7月23日 12:00～17:00JST
(下図) 事例No.3 2013年7月29日 06:00～16:00JST

で計り、プロベラ式流量計を用いて流速を計り流量を算出した。また周辺河川の流量はYSI社製リバーサーベイヤーM9を用いて2015年2月3日に調査した(写真3-1参照)。リバーサーベイヤーM9は水深、流速及び位置(D-GPS)のデータを同時に計測できるため川を横断することにより流量を算出できる。リバーサーベイヤーM9はトランスデューサー3.0MHzを3.0MHz及び



写真3-1 リバーサーベイヤーM9での調査風景

1.0MHzを4基づつ備え周波数は自動切替であり、計測範囲は水深0.06m～30m、流速は±20m/秒で精度は±0.25%または±0.2cm/秒である。

3-1-2 調査結果

表3-1のとおり、湧池①では0.083m³/s、②では0.396m³/s、③では0.692m³/sと湧池から下流にいくにしたがい流量は増加した。

表3-1 忍野八海における流量

調査位置	流量	備考(使用した機器)
①	0.083 m ³ /s	プロペラ式流速計
②	0.396 m ³ /s	リバーサーベイヤーM9
③	0.692 m ³ /s	リバーサーベイヤーM9

3-2 河口湖の湖底地形調査

3-2-1 調査場所及び方法

河口湖の湖底地形を把握するため、図3-2のとおり河口湖うの島周辺で湖底地形調査を行った。

3-2-2 調査結果

河口湖の湖底地形を把握するため、図3-3に河口湖うの島周辺で湖底地形調査を行った航跡を示す。なお、うの島南側は、写真3-2のとおり溶岩が湖面から露出しており水深が浅く船が近づくことができないため計測していない。

調査区域での最深部はうの島東側で水深は14m程度であった。また、図3-4のとおり、うの島南側においては凹凸が激しく、溶岩が湖面から露出していることから広い範囲で溶岩が存在していると考えられた(図5参照)。



図3-2 河口湖における湖底地形調査位置(国土地理院地図:下側が南)

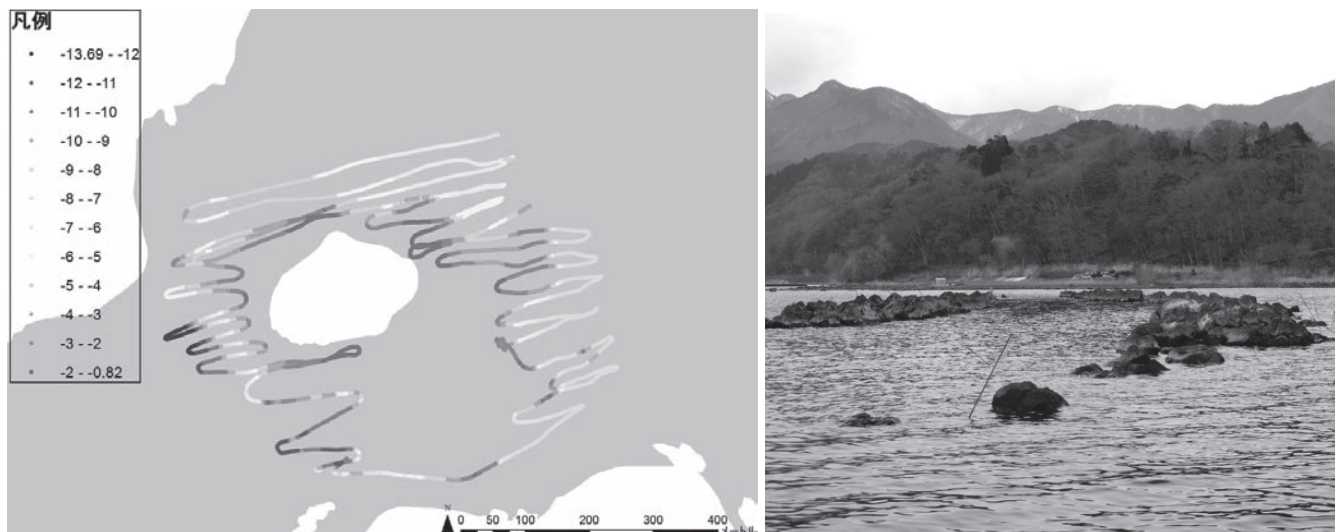


図3-3 河口湖うの島周辺で湖底地形調査を行った航跡と水深

写真3-2 うの島南側の溶岩

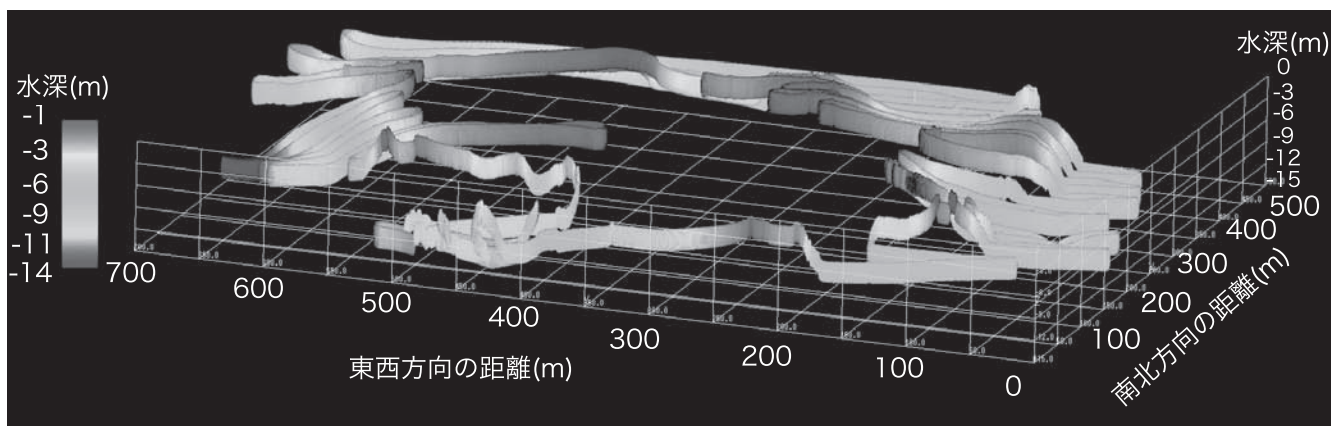


図3-4 リバーサーベイヤーの航跡と水深 (図の下方向が南)

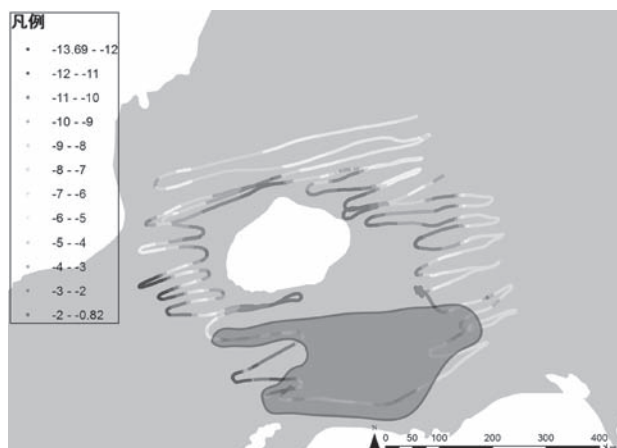


図3-5 河口湖うの島周辺において溶岩の存在が示唆される領域

4. 河口湖の湖底湧水

富士五湖では古くより湖底湧水の存在が示唆されてきた⁴⁾。一般に流入河川に乏しいこれら湖では、湖底湧水は水源として水質の維持に重要な役割を果たしていると同時に、フジマリモ等希少な生物の生育地となっている⁵⁾。しかしこうした湧水の1箇所あたりの湧出量は総じて微量であり、また水源涵養のメカニズムも捉えにくいことから十分な保全対策が行われていないのが現状である。

河口湖では従来冬季の結氷状況などから湧水箇所の推定がなされている^{6), 7)}。しかし結氷の有無は湧水以外の要因によっても左右されるため、その実態については未だ不明な点が多い。近年、河口湖の表層水のバナジウム(⁵¹V)濃度が、夏の水位上昇期に増加するとの報告があり⁸⁾、バナジウムをトレーサーとすることで湖への流入水塊の実態を捉えられる可能性が出てきた。こうした背景から昨年度の研究では、湖底直上水中のバナジウム濃度の湖内分布を調べた⁹⁾。その結果、河口湖西湖盆の東側の湖底でバナジウム濃度の高い水域が分布することが明らかとなった(図4-1)。特に鵜の島西方では、直接

の流入河川がないにもかかわらず、バナジウム濃度の高い水塊が南岸に沿って確認され、溶岩台地からの局所的な地下水流入のあることが示唆された⁹⁾。

一方その後の調査により、これまで表層水中で報告されてきた冬季の水中バナジウム濃度の低下⁸⁾が、底層でも起こっていることが明らかとなった(山本未公表データ)。一般に河口湖の湖水中のバナジウム濃度は、周辺地下水に比べ濃度が低く、これは主に地表を流れてきたバナジウム濃度の低い雨水や雪解け水が湖に流入しているためと解釈されてきた¹⁰⁾。しかしこうしたモデルでは、水位が低下し流入水が減少するはずの冬季にバナジウム濃度が湖全体で低下することを調和的に説明できない。

こうした背景から本年度の研究では、河口湖におけるバナジウム濃度の鉛直分布の季節変動を調べ、水質データと比較することでその変動メカニズムを検討した。また、河口湖における湧水の実態を把握するために、鵜の島西部において超音波流速計による湖内流動観測並びに携帯型CTD計による湖内の水温・電気伝導率の測定を行った。

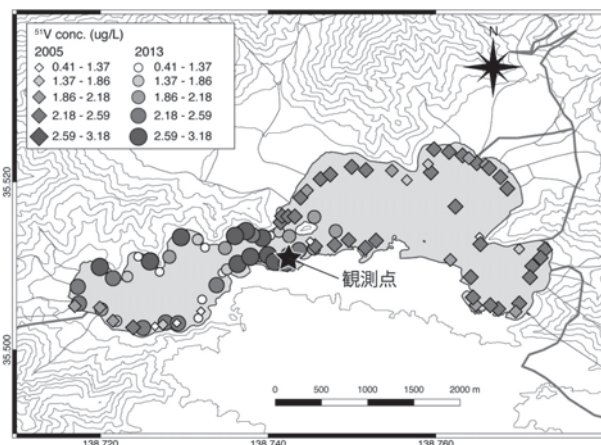


図4-1 河口湖湖底直上水中のバナジウム濃度の分布及び本研究の観測点 (内山ほか⁵⁻⁶⁾に加筆)

4-1 実験方法

4-1-1 微量元素分析

本研究では、昨年度の調査で比較的高濃度のバナジウムが確認された鶴の島西部の観測点(図4-1)において、2014年8月28日、9月29日、10月23日にバンドーン式採水器(離合社/アクリル製)を用い表層から湖底まで1m毎に湖水試料を採取した。採取した試料は、孔径0.20 μ mのメンブランフィルターで濾過したものを10mL分取し、硝酸0.1mLを加えたものを分析用試料とした。測定には、山梨県富士山科学研究所の誘導結合プラズマ質量分析計(HP-4500:横河アナリティカルシステムズ社)を用い、絶対検量線法による定量を行った。ブランク試料中のバナジウム含有量は測定限界以下であり、バナジウムの測定精度は $\pm 1\%$ であった。

4-1-2 湖内流動観測

湖内流動観測は、2015年1月29日に鶴の島の西側の水域(計24地点)で行った。測定には、県衛生環境研究所の1.5MHz超音波ドップラー流速計(Sontek社)を使用し、表層から湖底まで層厚50cmに設定されたセル内の平均流速・流向を120秒間測定した。

4-1-3 水質(水温・電気伝導率)観測

水質観測には、ワイエスアイ・ナノテック社の携帯型CTD計を使用した。水温と電気伝導率の測定精度はそれぞれ $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.25\% \pm 5\mu\text{S/cm}$ である。得られた観測データは、General Mapping Tool(GMT)のスプライン補間を行うsurfaceコマンド¹¹⁾を用いて格子化し、等値線図を作成した。なお、surfaceコマンドでは補間

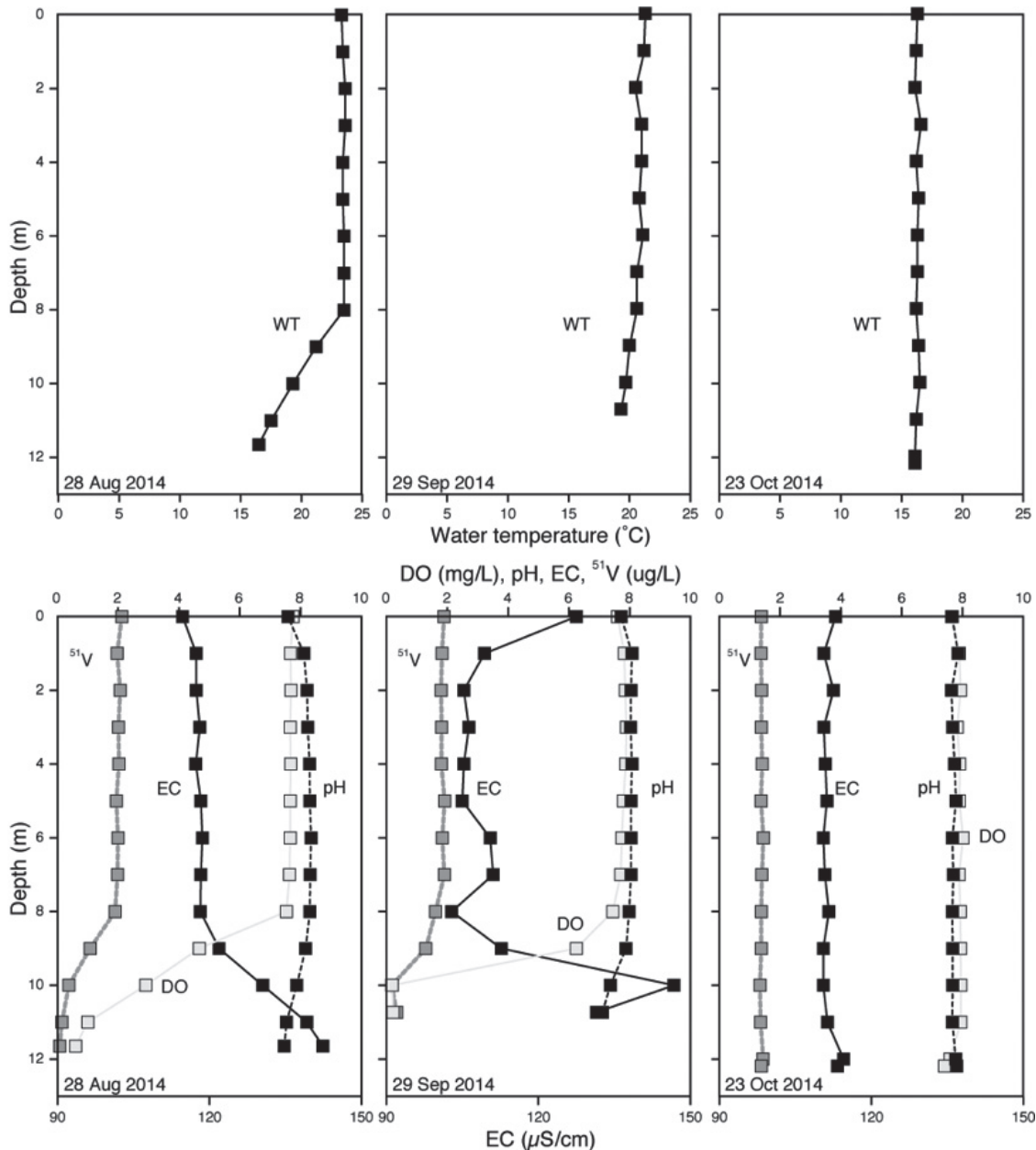


図4-2 河口湖における8月から10月の水温及び溶存酸素濃度、pH、EC、バナジウム (^{51}V) 濃度の鉛直分布の変化

データによって形成される局面の曲率をテンションとして調整でき本研究では0.25 (水温), 0.75 (電導率) を用い計算した。

4-2 結果および考察

4-2-1 湖水中バナジウムの鉛直分布の季節変動

図4-2に各採水日における水質データ (水温・pH・電気伝導率・溶存酸素濃度) 並びにバナジウム濃度の鉛直分布を示した。水温の鉛直分布は、8月の水深8m以深で減少傾向にあり、水温躍層の発達を示していた。一方、9月になると水温躍層は縮小し始め、10月には完全に消滅し循環期に入ったことが示唆された (図4-2)。これに対し溶存酸素濃度 (DO) は、躍層の発達する8月と9月の水深8m以深で低下する傾向がみられた (図4-2)。一方、電気伝導率 (EC) はDO分布とは逆に貧酸素状態が強い水深8m以深で増加する傾向にあった (図4-2)。ただし9月には、湖底付近でECの減少が見られた。バナジウム濃度は、DO分布とよく似た鉛直分布を示し、水温躍層の発達する8月と9月の水深8m以深で減少する傾向が見られた (図4-2)。なおECの低下が見られた9月の湖底付近のサンプルでは、DO並びにバナジウム濃度の増加が見られ、湖底湧水の存在が示唆された。

従来河口湖では、表層水中のバナジウム濃度が周囲の

地下水に比べて低く、主に地表を流れてきた雨水や雪解け水が湖に流入するためと解釈されてきた¹⁰⁾。しかし、本研究の結果を見ると、降水によって水位が上昇する夏季の底層でバナジウム濃度が低下しているものの、降水の影響を強く受けると考えられる表層水では逆に濃度が高くなっていった。降水中に含まれるバナジウムは一般に0.1 $\mu\text{g/L}$ 以下であり、このことは降水の流入が湖水表層中のバナジウム濃度を低下させているわけではないことを示している。

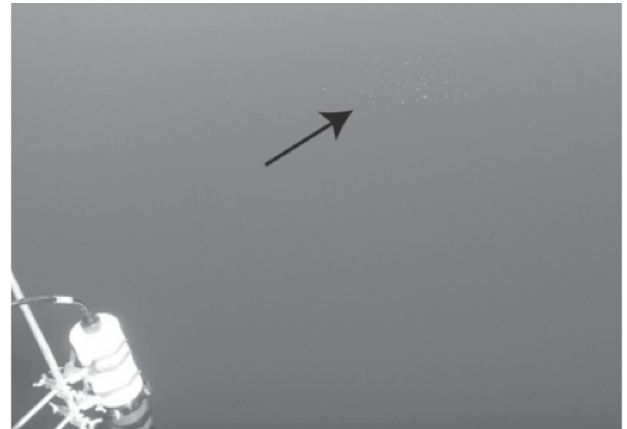


図4-4 平成27年1月29日に河口湖で観察された湖底より湧き上がる気泡 (矢印)

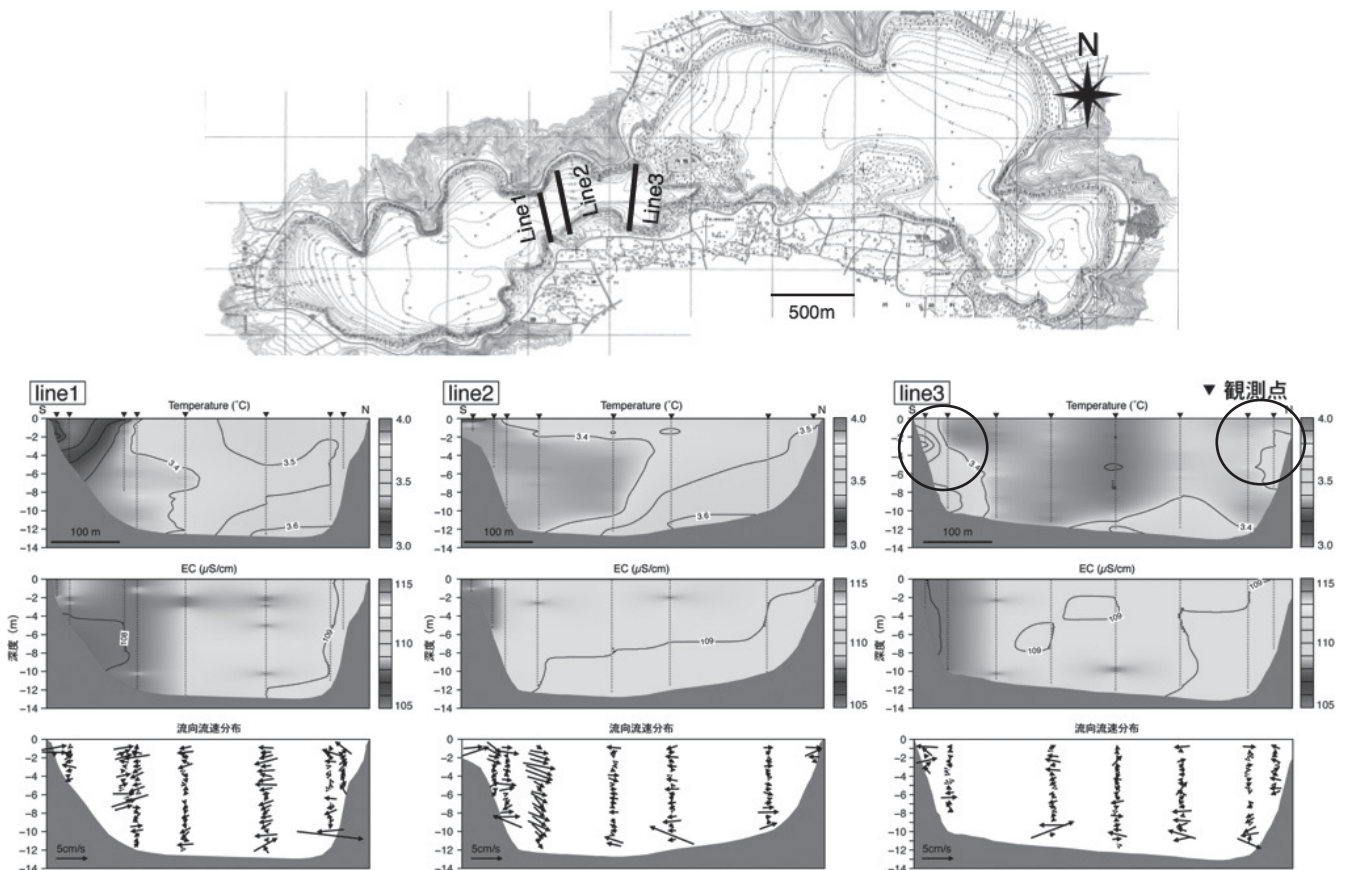


図4-3 河口湖における水質 (水温・電気伝導率)・流動状況の観測結果

一般に水環境中のバナジウムは、水-粒子間の相互作用や、陸起源・生物起源物質、水酸化鉄粒子、マンガノ酸化物、酸化状態の変化に伴う吸着脱着メカニズム等によるスキヤベンジグ(除去)により非保存的挙動を示すことが知られている¹²⁾。河口湖では、水温躍層が発達しDOが低下する8月と9月の水深8m以深でバナジウム濃度が減少しており、こうした環境下でバナジウムのスキヤベンジグ(除去)が起こっている可能性がある。なおスキヤベンジグとは複雑に絡み合った粒子と溶存化学種との反応によって水中から微量元素が除去される場合の便宜的な総称であり、Goldbergによって1954年に提唱された¹³⁾。

その後10月に入ると、底層のバナジウム濃度は増加する一方で表層水中のバナジウムは減少しており、水温躍層の消滅によりバナジウム濃度の低い底層水とバナジウム濃度の高い表層水の鉛直混合が起こっていることが推察される。吉澤らの先行研究⁸⁾によれば、河口湖で表層水中のバナジウム濃度が増加するのは6月から8月にかけてであり、この時期にバナジウムが湖水に再付加されている可能性が高い。

一般に、降水や大気降下物中に含まれるバナジウムの起源は人為起源であり、バナジウム/ニッケル比が0.16から1.88の値を示すことが知られている¹⁴⁾。これに対して湖水中のバナジウム/ニッケル比は 6.4 ± 3.3 であり、湖水中のバナジウムが自然起源であることを示唆している。今後水位上昇期にバナジウム濃度の増加する深度を調べることで、湖水へのバナジウム付加のメカニズムが解明できると期待される。

4-2-2 河口湖の水質・湖内流動観測

図4-3には、CTD計と超音波流速計による水質及び湖内流動状況の観測結果を示した。測定された流速は、ほとんどの場所で2cm/s以下と低かったが、ライン1とライン2の北側の水深0から2m付近では、湖岸から湖内へと向かう比較的速い流速が観測された(図4-3)。また水温観測結果からは、ライン1とライン2で北ほど高い値を示す傾向が見られる一方、ライン3では南北両岸の水深2から4mの場所で水温の高い水塊が分布している様子が確認された(図4-3の丸印)。電気電導率はいずれも南岸沿いで低く、北岸ほど高い傾向を示した。残念ながら観測日が少なかったことから、水の流れを連続的に追跡することはできなかったが、水質の違いからそれぞれ御坂山地及び富士山の溶岩台地を起源とする水の流入が示唆された。

また1月の観測時に、通称黒岩ワンドと呼ばれる場所で、湖底より湧き上がる気泡が観察された(図4-4)。河口湖ではしばしば堆積物中の有機物の分解により発生したメタンが気泡として湧き上がることが知られている¹⁵⁾。こうした場所は主に湖底にヘドロが厚く堆積した湖底平

原となっているが、今回気泡が観察された場所は水深10m程度の溶岩斜面上にあり、従来メタンガスが報告されてきた場所¹⁵⁾とは異なっていた。気泡の正体は不明だが、今回気泡が観察された黒岩ワンド周辺はフジマリモの生育地としても知られており⁵⁾、湧水との関連性が示唆される。

かつて河口湖は雨水の溜まった湖だと考えられていた時期もあった。しかし、本年度の調査結果はそのような単純な集水過程を支持していない。近年地元では河口湖の湧水の減少を危惧する声もあり、今後湧水箇所の特定期や湧水量の把握などを行なった上で水源維持に必要な保全策を講じていく必要があると考えられる。

5. 結言および今後の課題

ここでは、今年度のまとめと今後の課題について、解析項目ごとに述べる。

5-1 XバンドMPレーダを用いた降水量推定

複数のXバンドMPレーダに基づいた合成データを用いた結果、富士山全体の降雨をカバーしつつ、狭い領域の降雨の多寡も緻密に捉えられることが分かった。また降水グリッド抽出方法の改善について検討を行ったところ、特に対流性降雨事例において推定精度を向上させることができた。一方層状性降雨については降雨強度の推定式による影響の方が大きいため、抽出方法の変更によって若干改善する程度の結果となった。

2013年夏季に富士山周辺域に降雨をもたらした事例は全40事例にわたるため、これら全事例についても解析を進め、独立峰の富士山に見られる夏季の特徴的な降雨を捉えていく予定である³⁾。また層状性降雨事例については推定精度を向上させる必要があることから、推定式を含めた改善方法を検討していくことは不可欠である。

5-2 河口湖の湖底湧水

今年度の研究により、従来雨水等の流入により濃度が低いと考えられていた河口湖の湖水中のバナジウムが、夏季底層で表層に比べ低い濃度を示すことが明らかとなり、湖に流入したバナジウムがスキヤベンジグ(除去)されている可能性のあることがわかった。またCTD計による水質観測の結果、河口湖西湖盆の南北両岸の崖斜面上において、湧水によると思われる水温の変化を確認することができた。今後、春から夏の水位上昇期にかけて水質測定を継続して行なうことで湧水箇所の特定期やそのメカニズムの解明が進むことが期待される。一方水源保全の必要性から、湖底湧水の水同位体比を測定しその涵養標高を明らかにすることも重要な課題である。また将来的には水中カメラにより湧水地周辺の水生生物の生育状況を確認するなど、湧水地の自然環境の保全に向け

た基礎データの収集を行っていく必要がある。

なお、本論1章は内山、2章は小田切・佐野、3章は村中・神谷・内山、4章は山本、5章は小田切・山本・内山がそれぞれ分担執筆した。

謝 辞

梨大レーダは山梨大学グローバルCOEプログラム「アジア域での流域総合水管理研究の展開」の支援を受けて運用されました。さらに国土交通省XRAINデータは国土交通省XバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアムを通じて提供を受けました。梨大レーダの立ち上げと運用において、神戸大学都市安全研究センター大石哲教授にご協力・ご指導をいただきました。また山梨県県土整備部治水課と山梨県道路公社には地上雨量計データをご提供いただいた。ここに関係各位に厚く御礼申し上げます。

富士山科学研究所火山防災研究部研究助手笠井明穂氏と蓮尾麻由子氏には河口湖・忍野八海の調査等本論をまとめるに当たって、お手伝いいただいた。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小田切幸次, 佐野哲也, 大石哲, 内山高, 小林浩: XバンドMPレーダを用いた富士北麓地域での降水量推定に関する検討, 水文・水資源学会2013年度研究発表会要旨集, 114-115. (2013)
- 2) 真木雅之, 朴相郡: 高仰角観測時のXバンド偏波レーダ降雨強度推定式. 防災科学技術研究所研究報告, 73, 41-47. (2009)
- 3) 小田切幸次, 佐野哲也, 大石哲, 内山高, 小林浩: 2013年夏季における富士山周辺域での降雨分布とその要因について, 日本気象学会2015年度春季大会(投稿中)
- 4) 石原初太郎: 富士山の地理と地質, 古今書院, 408p. (1928)
- 5) 山梨県教育委員会: マリモ学術調査報告書, 75p. (1981)
- 6) 山本寿々雄: 富士山国立講演博物館研究報告, 9, 13-14. (1963)
- 7) 有泉和紀, 吉澤一家: 山梨県衛生公害研究所年報, 45, 45-48. (2001)
- 8) 吉澤一家, 有泉和紀, 望月映希: 山梨県衛生公害研究所年報, 52, 85-88. (2008)
- 9) 内山高ほか: 山梨県総合理工学研究機構研究報告書, 9, 67-85. (2014)
- 10) Koshimizu, S. and Tomura, K.: Groundwater Updates, 171-176. (2000)

- 11) Wessel, P. and Smith, W.H.F.: EOS Trans. AGU, 72, 441, 445-446. (1991)
- 12) Wang, D. and Sanudo Wilhelmy, S.A.: Mar. Chem., 117, 52-58. (2009)
- 13) Goldberg, E.D.: J. Geol., 62, 249. (1954)
- 14) 浮遊粒子状物質対策検討会: 浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル, 400p. (1997)
- 15) 濱野一彦: 富士山ーその自然のすべてー. 同文書院, 170-186. (1992)

成果発表状況

学会発表

- 1) 小田切幸次, 佐野哲也, 大石哲, 内山高, 小林浩: 複数のXバンドMPレーダを用いた富士山周辺域での降雨量推定, 水文・水資源学会2014年度研究発表会, 宮崎, 2014
- 2) 山本真也, 長谷川達也, 吉澤一家, 中村高志, 内山高: 河口湖の湖底直上水の安定同位体比とバナジウム濃度の空間分布, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 横浜, 2014